

کاربرد هوش مصنوعی مولد در ارزیابی و رتبه‌بندی عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد سامانه‌های جمع‌آوری آب باران

نام	تحصیلات	رتبه علمی	وابستگی سازمانی	نام English	وابستگی سازمانی English
امامی اسکاردی، محمد جواد *	دکترای تخصصی	استادیار	گروه آموزشی عمران - دانشکده مهندسی و فناوری - دانشگاه مازندران	Emami-Skardi, Mohammad Javad	Civil Engineering Department- Faculty of Engineering and Technology- University of Mazandaran
هدایتی مرزونی، رضا	کارشناسی ارشد	سایر	2- دانشجوی کارشناسی ارشد فناوری معماری بیونیک دانشگاه مازندران	Hedayati Marzooni, Reza	Master's student in Bionic Architecture Technology, Mazandaran University
سمائی، یاسمن	سایر	سایر	کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه امام خمینی (ره)	Samaei, Yasaman	Masters in Water Resources Engineering, Imam Khomeini University

*mje.skardi@umz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸

چکیده

سامانه‌های جمع‌آوری آب باران به‌عنوان یکی از راهبردهای اساسی در مدیریت منابع آب، مورد توجه قرار گرفته‌اند. با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی و رشد تقاضای آب، بسیاری از مناطق جهان با بحران کمبود آب روبه‌رو هستند. این سامانه‌ها می‌توانند به‌عنوان رویکردی پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای مقابله با این مشکلات به‌کار گرفته شوند. این پژوهش با هدف شناسایی و رتبه‌بندی مناطق مناسب برای استحصال آب باران انجام شده است. با استفاده از هوش مصنوعی مولد، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و تحلیل داده‌های جغرافیایی در نرم‌افزار GIS، مناطق مستعد استان مازندران برای این هدف مشخص شده‌اند. از هوش مصنوعی ChatGPT-4 برای شبیه‌سازی نظرات کارشناسان در مقایسات زوجی استفاده شده است. نتایج این تحقیق علاوه بر کمک به توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، می‌تواند رویکرد استفاده از هوش مصنوعی را در مهندسی و مدیریت منابع آب نیز مورد سنجش قرار دهد. در نتایج به دست آمده شیب با وزن نهایی ۰/۲۴۱۲ و ژئومورفولوژی با وزن نهایی ۰/۰۳۷۲ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار وزن را داشتند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند تصمیم‌گیری‌های همراه با عدم قطعیت و چالش در مهندسی و مدیریت منابع آب را تسهیل کند.

کلیدواژه‌ها: جمع‌آوری آب باران، هوش مصنوعی مولد، تصمیم‌گیری چندمعیاره، اولویت‌بندی.

The Application of Generative Artificial Intelligence in Evaluating and Ranking the Key Factors Influencing the Performance of Rainwater Harvesting Systems

Received: 20/01/2025

Revised: 30/03/2025

Accepted: 08/06/2025

Abstract

Rainwater harvesting systems have been recognized as one of the fundamental strategies in water resource management. Considering climate change and the growing demand for water, many regions are facing water scarcity. These systems can be utilized as a sustainable and cost-effective approach to address these issues. This study aims to identify and rank suitable areas for rainwater harvesting. Using the Generative Artificial Intelligence, Analytical Hierarchy Process (AHP) and geographic data analysis in GIS software, potential areas in Mazandaran province have been identified for this purpose. ChatGPT-4 artificial intelligence was employed to simulate expert opinions in pairwise comparisons. The results of this research, in addition to aiding the development of rainwater harvesting systems, can also evaluate the use of AI in the water resources management and engineering. Among the obtained results, slope had the highest weight with a final value of 0.2412, while geomorphology had the lowest weight with a final value of 0.0372. The findings indicate that the use of AI can facilitate decision-making under uncertainty and challenges in water resource engineering and management.

Keywords: Rainwater Harvesting, Artificial Intelligence, Multi-Criteria Decision Making, Prioritization

۱- مقدمه

محدودیت منابع آبی، افزایش جمعیت و توسعه صنعتی که منجر به افزایش تقاضا برای آب می‌شود، همراه با کمبود فضاهای مناسب برای ایجاد زیرساخت‌های بزرگ مقیاس مانند سدها و پیامدهای زیست‌محیطی آنها، همچنین چالش‌های توسعه شبکه‌های آبرسانی و میزان بالای هدررفت آب در این سیستم‌ها، ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای پایدار و سازگار با محیط زیست را بیش از پیش نمایان می‌سازد (امامی اسکاردی و همکاران، ۱۴۰۱). در این راستا، جمع‌آوری آب باران به عنوان یک راهکار مؤثر می‌تواند به طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، به عنوان یکی از راهبردهای مهم در مدیریت منابع آب، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (Sharifian et al., 2022). با توجه به اینکه بسیاری از مناطق جهان با مشکلات کمبود آب مواجه هستند، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران می‌توانند به عنوان رویکردی پایدار و اقتصادی در مقابله با این چالش‌ها به کار گرفته شوند. این سامانه‌ها به ذخیره و استفاده از آب باران در محیط‌های شهری و روستایی کمک می‌کنند و به کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی و سطحی می‌انجامند (Raimondi et al., 2023).

یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، بهبود مدیریت منابع آب است. در بسیاری از مناطق شهری، بارش‌های سنگین باعث سیلاب‌های ناگهانی و ایجاد خسارت‌های زیادی به زیرساخت‌ها می‌شوند. با استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، می‌توان از این آب‌ها به عنوان منبع جایگزین استفاده کرد و همزمان از خطرات سیلاب جلوگیری کرد (Soh et al., 2023). این سامانه‌ها همچنین به کاهش تقاضای آب شرب کمک می‌کنند، زیرا آب باران می‌تواند برای مصارف غیر شرب مانند آبیاری فضای سبز و شست‌وشو مورد استفاده قرار گیرد (Nandi and Gonela, 2022). علاوه بر این، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران می‌توانند به حفاظت از محیط‌زیست کمک کنند. این سامانه‌ها با کاهش مصرف آب از منابع طبیعی، به حفظ تنوع زیستی و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از برداشت بی‌رویه آب کمک می‌کنند (Ward et al., 2012). همچنین، استفاده از این سامانه‌ها باعث کاهش انرژی مورد نیاز برای تصفیه و توزیع آب می‌شود، که به نوبه خود به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود (Li et al., 2010). در نهایت، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران به عنوان یک راه حل مؤثر برای مدیریت بحران‌های آبی در مناطق کم‌آب مورد توجه قرار گرفته‌اند. در مناطقی که با دوره‌های خشکسالی مکرر مواجه هستند، این سامانه‌ها می‌توانند به عنوان یک منبع آب پایدار و قابل اتکا عمل کنند (Bojer et al., 2024).

Zheng et al., (2023) از تکنیک‌های عوامل چندگانه مؤثر (MIF) و هم‌پوشانی فازی (Fuzzy Overlay) برای شناسایی مکان‌های مناسب جمع‌آوری آب باران در استان خیبر پختونخواه پاکستان استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که سامانه‌های جمع‌آوری آب باران یا Rainwater Harvesting (RWH) می‌توانند به کمبود آب در مناطق کوهستانی کمک کرده و تولید محصولات کشاورزی را بهبود بخشند. این تحقیق اهمیت تحلیل جغرافیایی در بهینه‌سازی اجرای سامانه‌های RWH برای مقاصد کشاورزی را نشان می‌دهد. برای مواجهه با عدم قطعیت‌های عمیق مرتبط با سامانه‌های RWH، مطالعه‌ای توسط Alves and Pacheco (2024) تأثیر تقاضای آب، تعرفه و نرخ تنزیل را بر قابلیت اجرایی سامانه‌های RWH

در برزیل ارزیابی کرد. پژوهش عملکرد سامانه‌های RWH را برای پیکربندی‌های مختلف شبیه‌سازی کرده و نتایج نشان داد که تعرفه آب و نرخ تنزیل تأثیر زیادی بر معیارهای عملکرد دارند. این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن عوامل اقتصادی در طراحی و اجرای سامانه‌های RWH را برجسته می‌کند. (Raghava Rao et al., 2024) با بهره‌گیری از شبکه‌های حافظه بلند-کو تا مدت Long Short-Term Memory (LSTM) چندبعدی و الگوریتم انتخاب کلونی یا Clonal Selection Algorithm (CSA)، به بررسی بهره‌وری سامانه‌های برداشت آب باران پرداخته است. این پژوهش با بهبود کارایی این سیستم‌ها، نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آبی ایفا می‌کند.

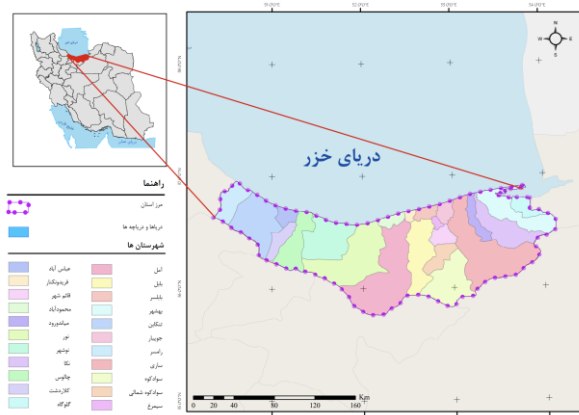
توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران برای مدیریت پایدار منابع آب ضروری است. هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری کلیدی به مهندسان در تحلیل داده‌ها در زمینه‌های مختلف مانند مدیریت پایدار منابع آب کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری بگیرند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین دقت و سرعت تحلیل‌ها را افزایش می‌دهند و منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی می‌شوند. در مهندسی عمران، هوش مصنوعی در طراحی سازه‌های هوشمند و پیش‌بینی شکست‌ها موثر است. در مهندسی برق و مکانیک، سامانه‌های هوشمند بهره‌وری را بهبود می‌بخشند و ضایعات را کاهش می‌دهند. همچنین، هوش مصنوعی در ربات‌ها و سامانه‌های خودکار برای انجام وظایف خطرناک کاربرد دارند. به طور کلی، این فناوری به نوآوری و کاهش ریسک‌ها در پروژه‌های مهندسی کمک می‌کند.

۲- روش‌شناسی

این پژوهش با هدف شناسایی و رتبه‌بندی مناطق مناسب برای استحصال آب باران در استان مازندران انجام شده است. روش‌شناسی تحقیق شامل تحلیل مقالات علمی، شبیه‌سازی نظرات کارشناسان با استفاده از هوش مصنوعی مولد، به‌ویژه ChatGPT-4، و به‌کارگیری فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای اولویت‌بندی معیارها و تحلیل‌های مکانی است. هدف نهایی این مطالعه، شناسایی و رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران با بهره‌گیری از هوش مصنوعی و تهیه نقشه‌ای از مناطق مناسب در استان مازندران است. در مرحله نخست، ۱۰۰۰ مقاله مرتبط با سامانه‌های جمع‌آوری آب باران شناسایی شد. سپس ۲۰۰ مقاله برتر با بیشترین ارتباط به موضوع، توسط پژوهشگران انتخاب شد. پس از بررسی این مقالات، ۵۰ معیار کلیدی در توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران شناسایی شد، که یکی از مهم‌ترین ملاک‌های انتخاب این معیارها، میزان تکرار آن‌ها در مطالعات مختلف بود. در گام بعد، ۱۰ کارشناس مجازی مبتنی بر هوش مصنوعی مولد (ChatGPT-4) تعریف شدند و مقایسه‌ی گزینه‌ها به صورت دوه‌دو براساس رویکرد AHP با استفاده از این مدل انجام شد. در نهایت، ماتریس نهایی با میانگین‌گیری هندسی از جدول‌های حاصل تهیه شد. پس از وزن‌دهی معیارها، ارزیابی و محاسبه نرخ ناسازگاری نیز انجام شد. نتایج پژوهش، به‌ویژه بخش‌هایی که قابلیت نمایش بصری داشتند، به صورت نقشه‌های تحلیلی ارائه شد تا مناطق مناسب برای استحصال آب باران به‌طور دقیق مشخص شوند.

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

مازندران، در شمال ایران، منطقه‌ای با ظرفیت بالای استحصال آب باران است. این استان با جمعیت حدوداً ۳/۳ میلیون نفر و وسعت ۲۳،۰۰۰ کیلومتر مربع، از شمال به دریای خزر و از جنوب به رشته‌کوه‌های البرز محدود می‌شود. اقلیم مازندران با بارش سالانه ۸۰۰ تا ۱،۲۰۰ میلی‌متر، به‌خصوص در پاییز و زمستان، منابع آب سطحی و زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تنوع زمین‌شناسی و خاک‌های غنی این استان، جذب و نگهداری آب باران را تسهیل می‌کند. همچنین، پوشش گیاهی و اکوسامانه‌های طبیعی باعث افزایش رطوبت خاک و بهبود شرایط استحصال آب باران برای مدیریت منابع آب و استفاده‌های کشاورزی، باغداری و دامپروری می‌شوند.



شکل ۱- نقشه محدوده استان مازندران و شهرهای آن

۲.۲. روش فرآینده تحلیل سلسله‌مراتبی (Analytical Hierarchy process)

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از تکنیک‌های معتبر تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در شرایط پیچیده و با وجود عدم قطعیت کاربرد دارد. این روش توسط توماس ساتی (Thomas Saaty) در دهه ۱۹۸۰ معرفی شد و به تحلیل و اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از مقایسات زوجی کمک می‌کند. در AHP، تصمیم‌گیرنده ابتدا معیارهای مهم را شناسایی کرده و سپس با مقایسه‌ی زوجی آنها، وزن‌های نسبی هر معیار را تعیین می‌کند (Darko et al, 2018). این روش با ساخت یک ماتریس مقایسات زوجی و استفاده از تکنیک‌های ریاضی مانند محاسبه‌ی مقدار ویژه، امکان محاسبه‌ی وزن‌ها و اولویت‌ها را فراهم می‌آورد. AHP همچنین به محاسبه‌ی نرخ ناسازگاری (CR) می‌پردازد تا اطمینان حاصل شود که مقایسات انجام شده منطقی و قابل قبول هستند (Al-Harbi, 2001). در این پژوهش، AHP به منظور شناسایی مکان‌های مناسب برای استحصال آب باران در استان مازندران به کار گرفته شده است؛ به طوری که وزن هر معیار به‌طور علمی و منطقی تعیین و در نهایت، به اولویت‌بندی گزینه‌های موجود منجر شده است.

۳.۲. هوش مصنوعی مولد

هوش مصنوعی یا Artificial Intelligent (AI) به‌عنوان یک فناوری نوین، توانایی پردازش و تحلیل داده‌های پیچیده را دارد و در بسیاری از حوزه‌ها، از جمله تصمیم‌گیری و تحلیل داده‌ها، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. هوش مصنوعی مولد (Generative AI) یکی از زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی است که با استفاده از الگوهای استخراج شده از داده‌های ورودی، قادر به تولید محتوای جدید مانند متن، تصویر، صدا و ویدئو می‌باشد. این فناوری در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده و به‌ویژه در میان عموم مردم به‌سرعت گسترش یافته است. بنابراین، انتظار می‌رود که در آینده نزدیک نقش بسزایی در زمینه‌های مختلف مهندسی و مدیریت منابع آب ایفا کند. مساله حیاتی در استفاده از هوش مصنوعی در سال‌های پیش‌روی کاربرد است آن نه به عنوان تنها یک ابزار بلکه به عنوانی عاملی تصمیم‌گیر در فرایندهای زندگی بشری و بخشی‌های از آن همانند علوم مهندسی است. نسخه‌های مختلفی از هوش مصنوعی تاکنون ارائه و گزارش شده است که برخی از آن‌ها امروز راه به زندگی اغلب انسان‌ها به ویژه در محیط‌های تخصصی پیدا کرده‌اند. ChatGPT-4 یک مدل زبانی پیشرفته از OpenAI است که توانسته با استفاده از یادگیری عمیق، به ایجاد محتوای متنی و تحلیل اطلاعات کمک کند. در این پژوهش، از ChatGPT-4 به‌عنوان یک مشاور مجازی برای انجام مقایسات زوجی در روش AHP استفاده شده است. این مدل با ارائه نظرات و تحلیل‌های کارشناسانه، توانسته است دقت و کارایی فرآیند تصمیم‌گیری را افزایش دهد.

استفاده از ChatGPT-4 در این مطالعه به شناسایی معیارهای موثر بر استحصال آب باران و تحلیل نظرات کارشناسان مجازی کمک کرده و موجب تسهیل در جمع‌آوری و پردازش داده‌ها شده است. به این ترتیب، ترکیب هوش مصنوعی و روش‌های سنتی مانند AHP به بهبود نتایج و کیفیت تصمیم‌گیری در انتخاب مکان‌های مناسب برای استحصال آب باران در استان مازندران انجامیده است.

۴.۲. نوع پژوهش

این پژوهش کاربردی است و هدف آن استفاده از نتایج برای یافتن اولویت پارامترهای موثر بر سامانه‌های استحصال آب باران و ارائه نقشه از مناطق مناسب برای استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در استان مازندران برای مدیریت بهتر منابع آب است. از نظر روش‌شناسی، این تحقیق ترکیبی محسوب می‌شود که داده‌های کیفی و کمی را دربرمی‌گیرد. در این پژوهش، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده و نتایج به دست آمده مستقیماً قابل استفاده در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های آتی خواهد بود.

۵.۲. گردآوری اطلاعات

۱.۵.۲. مطالعات کتابخانه‌ای

اولین مرحله پژوهش، جمع‌آوری اطلاعات از منابع علمی بود. با استفاده از موتورهای جستجوی معتبر مانند Scopus، Google Scholar و Web of Science حدود ۲۰۰ مقاله در زمینه استحصال آب باران و مکان‌یابی مناسب شناسایی شد. معیارهای انتخاب شامل تاریخ انتشار (فقط مقالات ده سال اخیر)، ارتباط با موضوع (مقالات مرتبط با استحصال آب باران و مکان‌یابی)، و اعتبار علمی (مقالات منتشر شده در مجلات معتبر) بود. مطالعه چکیده‌ها و بخش‌های کلیدی این مقالات منجر به شناسایی ۵۰ معیار اولیه برای مکان‌یابی شد.

جدول ۱- معیارهای استخراج شده از مقالات بررسی شده در زمینه استحصال آب باران و مکان‌یابی آن

ردیف	نویسنده (سال) مقاله	عنوان مقاله	معیارهای استخراج شده از مقاله
۱	خیرخواه، محمدی و معماریان. (۱۳۹۴).	تعیین مناطق مستعد استحصال آب باران یا استفاده از تحلیل سلسله مراتبی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رود سراب شهرستان خوشاب استان خراسان رضوی)	کاربری اراضی، شیب، نفوذپذیری، بافت خاک، عمق خاک و فاصله از آبراهه
۲	اکبرپور، خاشعی، کشاورز و فروغی فر. (۱۳۹۵).	تعیین مکان‌های مناسب جمع‌آوری آب باران جهت استفاده در مصارف کشاورزی با استفاده از مدل AHP (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بیرجند)	شیب، کاربری اراضی، بافت خاک، زهکشی، فاصله تا مناطق مسکونی، فاصله تا زراعت‌های آبی، فاصله تا زراعت‌های دیم
۳	سلطانی، سلیمانی و کریم. (۱۴۰۱)	مکان‌یابی مقایسه‌ای جمع‌آوری آب باران (مطالعه موردی: حوضه‌های میخوران و خسروآباد استان کرمانشاه)	پوشش گیاهی، تاج پوشش، درصد شیب، جهت شیب، بارندگی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، ژئومورفولوژی، طبقات ارتفاعی، فرسایش
۴	نوروززاده، محسن، قانع‌ی بافقی و تازه. (۱۴۰۱)	کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تعیین نقاط مناسب برای احداث سازه‌های جمع‌آوری آب باران	بارندگی، شیب، شوری زمین، پوشش گیاهی، بافت، ژئومورفولوژی
۵	عربی علی آباد و ملکی نژاد. (۱۳۹۴)	ارزیابی استحصال آب باران از ساختمان‌های مسکونی (مطالعه موردی شیراز)	بارندگی، پوشش گیاهی، جنس خاک، نوع خاک، مسائل زیست محیطی

ردیف	نویسنده (سال) مقاله	عنوان مقاله	معیارهای استخراج شده از مقاله
۶	فقیهی و جهانتیغ. (۱۴۰۲)	تعیین مکان های مناسب برداشت آب باران با استفاده از GIS	توپوگرافی، شیب زمین، نوع خاک، شدت بارندگی، پوشش کاربری زمین، زهکشی، جریان رودخانه و معیارهای اجتماعی-اقتصادی
۷	اکبرپور، صادقی، فروغی فر، حامد و شهیدی. (۱۳۹۴)	مقایسه روش های مکان یابی مناطق مستعد جمع آوری باران به کمک سیستم پشتیبانی تصمیم DDS مبتنی بر GIS	بارندگی، شیب حوضه آبریز، عمق خاک، بافت خاک، شبکه آبراهه های دشت، کاربری اراضی منطقه
۸	معماریان، حسین نیا، توسلی، کومه، تاج بخش، عباسی و پارسایی. (۱۳۹۴)	ملاحظات و استانداردهای زیست محیطی اجرای سیستم های استحصال آب باران در منازل مسکونی	مخزن، سطح آبریز، ناودان ها، آبروها، بررسی پیامد های زیست محیطی، بررسی اقتصادی، بررسی اجتماعی
۹	Toosi, Tousi, Ghassemi, Cheshomi, and Alaghmand (2020)	A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting	بارش، شیب زمین، نوع خاک، عمق خاک، کاربری زمین، خشکسالی
۱۰	Noori and Ghasemlounia (2019)	A Review of Criteria In Rain Water Harvesting Management	بارش باران، شیب زمین، بافت خاک، خشکسالی، پوشش زمین، کاربری زمین، فاصله زمین از جاده و سایر مکان ها، عوامل اجتماعی-زیست محیطی، تکتونیک و زمین شناسی مربوط به سازه، عوامل کشاورزی
۱۱	Mosase, E., Kayombo, B., Tshoko, R., & Tapela, M. (2017)	Assessment of the Suitability of Rain Water Harvesting Areas Using Multi-Criteria Analysis and Fuzzy Logic	عوامل اقلیمی (بارش)، عوامل مربوط به خاک (بافت، عمق، زهکشی)، عوامل توپوگرافیکی (شیب)، پوشش زمین
۱۲	Martínez-Acosta, L., López-Lambrano, A. A., & López-Ramos, A. (2019)	Design Criteria for Planning the Agricultural Rainwater Harvesting Systems: A Review	عوامل مربوط به جغرافیا (بارش، تبخیر، رطوبت، سرعت باد، تابش)، عوامل فیزیوگرافیک (شبکه زهکشی، شیب، رواناب، حوضه آبریز، کاربری)، عوامل مربوط به خاک (عمق، پوشش، بافت)، عوامل اجتماعی-اقتصادی (تعداد ساکنان، ذی نفعان، هزینه، مالکیت زمین، تورم)، عوامل مربوط به فاصله از (جریان های آب، محصولات زراعی)
۱۳	Ammar, A., Riksen, M., Ouessar, M., & Ritsema, C. (2016)	Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review	عوامل بیوفیزیکی، عوامل اقتصادی-اجتماعی
۱۴	Singh, L. K., Jha, M. K., & Chowdary, V. M. (2017)	Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospectiv water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply	ضریب رواناب، شیب، زهکشی، عوامل زمین شناسی
۱۵	Alwan, I. A., Aziz, N. A., & Hamoodi, M. N. (2020)	Potential Water Harvesting Sites Identification Using Spatial Multi-Criteria Evaluation in Maysan Province, Iraq	جاده ها، شیب زمین، جریان آب، بارش، خاک، تبخیر

۲.۵.۲. تعریف کارشناسان مجازی با استفاده از هوش مصنوعی

پس از شناسایی معیارهای اولیه، به جای استفاده از کارشناسان واقعی برای مقایسات دودویی در AHP، از هوش مصنوعی برای شبیه سازی نظرات کارشناسان استفاده شد. به این منظور، در Chat GPT-4 پروفایل های شخصی و تخصصی برای کارشناسان مجازی تعریف شد. ده کارشناس تعریف شده در (جدول ۲) مشاهده می شوند.

جدول ۲- کارشناسان مجازی تعریف شده برای هوش مصنوعی

۱	کارشناس متخصص هیدرولوژی	۶	کارشناس متخصص اقلیم‌شناسی
۲	کارشناس متخصص مهندسی عمران	۷	کارشناس متخصص مهندسی منابع آب
۳	کارشناس متخصص مهندسی محیط‌زیست	۸	کارشناس متخصص اقتصاددان محیط‌زیست
۴	کارشناس متخصص برنامه‌ریزی شهری	۹	کارشناس متخصص مهندسی کشاورزی
۵	کارشناس متخصص زمین‌شناسی	۱۰	کارشناس متخصص مهندسی GIS

هرکدام از متخصصان مذکور با ویژگی "دارای دکتری تخصصی در زمینه خودشان و سابقه کار در زمینه مرتبط برای ۱۵ سال" تعریف شدند. سپس از Chat GPT-4 خواسته شد که با توجه به این پروفایل‌ها، به عنوان این کارشناسان در مقایسه و اولویت‌بندی معیارها نظر دهد. هر کارشناس مجازی نظر خود را درباره اهمیت معیارها ارائه کرد و از این نظرات در مقایسه‌های دودویی روش AHP استفاده شد. این فرآیند این امکان را می‌دهد تا بدون نیاز به مصاحبه با کارشناسان واقعی، که ممکن است در دسترس نباشند، نظرات دقیق و شبیه‌سازی شده‌ای را برای تحلیل به دست آوریم. همچنین از سایر مزایای این روش می‌توان به سرعت بخشیدن در انجام مقایسات، کم کردن هزینه‌های مربوط به پرسش و پرسش‌نامه و حذف خطاهای انسانی در روش معمول پرسش‌نامه اشاره کرد.

۳،۵،۲. انتخاب معیارهای نهایی

پس از تحلیل داده‌های اولیه استخراج شده از مقالات، ۱۰ معیار پرتکرار و با اهمیت انتخاب شد. به این معیارها در (جدول ۳) پرداخته شده است.

جدول ۳- معیارهای پرتکرار در مقالات استخراج شده

شیب زمین	شبکه آبراهه‌ها
بارندگی	عمق خاک
بافت خاک	زهکشی
کاربری اراضی	معیارهای اجتماعی
پوشش گیاهی	ژئومورفولوژی

این معیارها به عنوان مهم‌ترین عوامل در مکان‌یابی برای استحصال آب باران در نظر گرفته و برای تحلیل استفاده شدند.

جدول ۴- بررسی تعداد تکرار هر معیار در مقالات بررسی شده

ردیف	معیار	تکرار
۱	شیب زمین	۱۳
۲	بارندگی	۱۰
۳	بافت خاک	۹
۴	کاربری اراضی	۸
۵	پوشش گیاهی	۶
۶	شبکه آبراهه‌ها	۶
۷	عمق خاک	۵
۸	زهکشی	۵
۹	معیارهای اجتماعی	۵
۱۰	ژئومورفولوژی	۵

۶.۲. فرآیند تحلیل داده‌ها با روش AHP و هوش مصنوعی

۱.۶.۲. روش AHP (فرآیند تحلیل سلسله مراتبی)

روش AHP برای تحلیل داده‌ها و تعیین اهمیت نسبی معیارها استفاده شده است. این روش از طریق مقایسه زوجی معیارها، به تعیین وزن هر معیار در فرآیند تصمیم‌گیری کمک می‌کند. هر معیار با معیارهای دیگر به صورت دو به دو مقایسه شده و بر اساس اهمیت نسبی خود در استحصال آب باران امتیاز داده شدند. این مقایسات توسط کارشناسان مجازی تعریف شده در Chat GPT-4 انجام شدند.

۲.۶.۲. شبیه‌سازی مقایسات جفتی با استفاده از Chat GPT-4

از Chat GPT خواسته شد که به عنوان هر یک از کارشناسان مجازی، مقایسات دو به دوایی بین معیارها را انجام دهد. این مقایسات بر اساس پروفایل تخصصی هر کارشناس انجام شد و هر یک از کارشناسان مجازی نظرات خود را در خصوص اهمیت هر معیار نسبت به معیار دیگر ارائه کردند. به این ترتیب، برای هر معیار یک ماتریس مقایسه‌ای تولید شد.

۳.۶.۲. ایجاد ماتریس نهایی

در نهایت، ۱۰ ماتریس مقایسه‌ای برای ۱۰ معیار از طریق متخصصان مجازی تعریف شده در Chat GPT-4 تولید شد. سپس با ترکیب این ماتریس‌ها و استفاده از میانگین هندسی، یک ماتریس نهایی ایجاد شد که اهمیت نسبی هر معیار را مشخص می‌کند.

۷.۲. ملاحظات اخلاقی

در این پژوهش از کارشناسان واقعی استفاده نشده، بلکه از پروفایل‌های مجازی تعریف شده در Chat GPT-4 بهره گرفته شد. این امر منجر به حذف نیاز به دریافت رضایت‌نامه از افراد حقیقی شد. همچنین تمامی منابع علمی به درستی ارجاع داده شده‌اند و اصول اخلاقی در گردآوری و تحلیل داده‌ها رعایت شده است.

۸.۲. جمع‌بندی

در انتها، مراحل مختلف پژوهش از گردآوری اطلاعات، شبیه‌سازی نظرات کارشناسان با Chat GPT-4، تحلیل داده‌ها با استفاده از AHP تشریح شد. اولویت‌بندی نهایی این پژوهش، پارامترهای موثر بر سامانه استحصال آب باران را مشخص می‌کند که می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کاربردی برای مدیریت منابع آب در استان مورد استفاده قرار گیرد.

۳- نتایج

در این مقاله، رویکردی نوین برای اولویت‌بندی پارامترهای موثر بر سامانه‌های استحصال آب باران و ارائه نقشه مکان‌های مناسب برای استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در استان مازندران ارائه شد. این رویکرد با استفاده از ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و هوش مصنوعی ChatGPT-4 طراحی و پیاده‌سازی شد. هدف اصلی، ارزیابی و اولویت‌بندی معیارهای مختلف مؤثر بر سامانه‌های استحصال آب باران با بهره‌گیری از دیدگاه‌های کارشناسی مجازی، ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری دقیق و کارآمد و درنهایت ارائه نقشه مکان‌های مناسب برای استفاده از این سامانه‌ها در استان مازندران بود.

۱.۳. ترکیب AHP و ChatGPT-4

ابتدا ۱۰ معیار کلیدی به عنوان عوامل مؤثر بر انتخاب مکان مناسب طبق مطالعات صورت گرفته از مقالات تعیین شدند. (جدول ۴) سپس ۱۰ کارشناس مجازی در زمینه‌های مختلف مرتبط تعریف شدند، این جدول‌ها که از هوش مصنوعی گرفته شده، در شکل ۲ نمایش داده شده است. سپس با استفاده از مدل ChatGPT-4، ماتریس‌های مقایسه زوجی برای هر کارشناس مجازی بر اساس دانش و تخصص آن‌ها تشکیل شد (پیوست ۲).

۲.۳. محاسبه ماتریس‌های مقایسه زوجی و ماتریس‌های نهایی

پس از تشکیل ۱۰ ماتریس مقایسه زوجی برای ۱۰ کارشناس تعریف شده، میانگین هندسی این ماتریس‌ها برای ماتریس نهایی محاسبه شد (جدول ۵). ماتریس پایانی نمایانگر دیدگاه کلی تمامی کارشناسان مجازی درباره اهمیت معیارها در انتخاب اولویت پارامترهای مؤثر بر سامانه استحصال آب باران است.

جدول ۵- ماتریس نهایی مقایسات زوجی ۱۰ کارشناس مجازی خروجی هوش مصنوعی

ماتریس پایانی										
معیارها	شیب زمین	بارندگی	بافت خاک	کاربری	پوشش	شبکه آبراهه	عمق خاک	زهکشی	معیارهای	ژنومورفولوژی
شیب زمین	۱	۳/۷۵	۴/۷۸۷	۲/۶۶۵	۱/۱۴۲	۳/۴۱۱	۳/۲۸۸	۲/۶۵۸	۲/۶۵۷	۴/۵۴۵
بارندگی	۰/۸۲	۱	۳/۴۴۳	۱/۱۵۷	۱/۱۹۰	۲/۲۶۰	۳/۵۱۲	۲/۴۴۰	۱/۹۴	۳/۱۴۰
بافت خاک	۰/۸۰۲	۰/۷۹۲	۱	۰/۸۶	۰/۹۳	۱/۵۲۷	۲/۴۱	۱/۹۳۲	۱/۶۹۸	۳/۹۸۱
کاربری	۰/۱۹۳	۰/۷۶۵	۱/۸۲۰	۱	۰/۷۰۹	۱/۵۷۴	۱/۸۷۹	۱/۶۲۸	۱/۵۳۱	۲/۳۴۷
پوشش	۰/۶۰۸	۰/۷۱۹	۲/۳۵۱	۱/۳۱۱	۱	۲/۳۰۳	۳/۵۷۰	۲/۹۶۰	۱/۸۴۴	۲/۸۴۹
شبکه آبراهه	۰/۱۲۳	۰/۳۸۴	۰/۱۸۵	۰/۶۷۶	۰/۸۳۴	۱	۲/۶۶	۱/۴۸۴	۰/۳۵۶	۲/۵۷۳
عمق خاک	۰/۵۵۲	۰/۱۳	۰/۹۶۴	۰/۸۹۴	۰/۷۲۳	۰/۴۷۳	۱	۱/۷۵۵	۱/۴۴۱	۲/۶۳۳
زهکشی	۰/۸۴۳	۰/۳۸۴	۰/۴۰۸	۰/۴۴۵	۰/۷۶۴	۰/۱۷۶	۰/۴۵۶	۱	۱/۹۵	۱/۹۴۵
معیارهای	۰/۵۶۳	۰/۲۶۶	۰/۶۴۵	۰/۵۷۶	۰/۷۶۵	۱/۵۵۲	۰/۵۶۶	۰/۷۱۷	۱	۱/۳۰۸
ژنومورفولوژی	۰/۲۲	۰/۹۲۳	۰/۲۱۳	۰/۷۶۳	۰/۸۳۳	۰/۱۲۴	۰/۷۲۴	۰/۶۴۶	۰/۳۵۵	۱

۳.۳. وزن معیارها و اولویت‌بندی

وزن‌های نهایی معیارها از طریق نرمال سازی ماتریس پایانی به دست آمدند (جدول ۶). نتایج نشان داد که معیار شیب زمین بالاترین اهمیت و ژنومورفولوژی و عمق خاک کمترین اهمیت را در مکان‌یابی برای استحصال آب باران دارند.

جدول ۶- وزن نرمال شده معیارها پس از محاسبه میانگین هندسی خروجی هوش مصنوعی

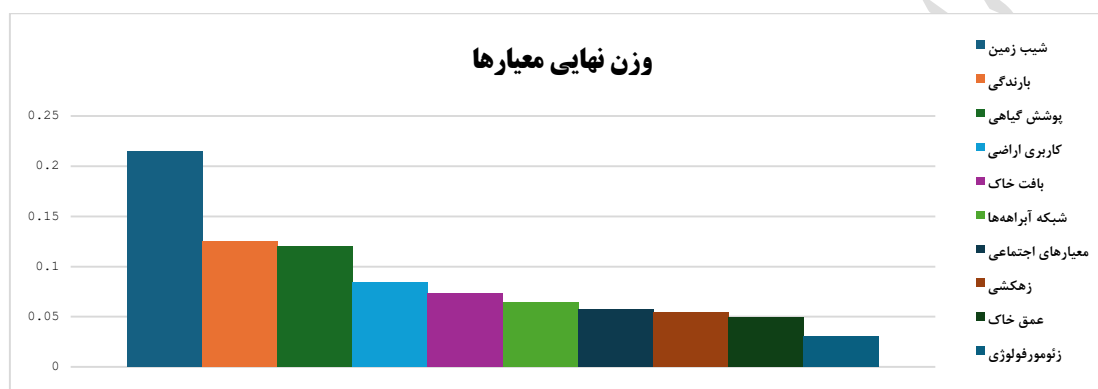
معیار	ژنومورفولوژی	معیارهای اجتماعی	زهکش	عمق خاک	شبکه آبراهه‌ها	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	بافت خاک	بارندگی	شیب زمین
وزن نهایی	۰/۰۳۷۲	۰/۰۶۵۹	۰/۰۶۳۴	۰/۰۵۵۳	۰/۰۷۳۵	۰/۱۴۱۲	۰/۰۹۹۷	۰/۰۸۱۵	۰/۱۴۱۰	۰/۲۴۱۲

جدول ۷- بردار اولویت برای ماتریس پایانی (این بردار نشان‌دهنده اولویت معیارها در روش AHP است)

2.5411
1.4799
0.8637
0.9962
1.4269
0.7682
0.5831
0.6490
0.6807
0.3784

بردار اولویت برای ماتریس پایانی در جدول شماره ۶ نمایش داده شده است.

نمودار ۱- وزن نهایی هر معیار



۴.۲. نرخ ناسازگاری

نرخ ناسازگاری شاخصی است که میزان سازگاری پاسخ‌های خبرگان به ارزیابی‌ها و مقایسات زوجی را اندازه‌گیری می‌کند. برای ارزیابی سازگاری مقایسات، نرخ ناسازگاری (CR) مطابق فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

مقدار ویژه λ_{max} برای ماتریس پایانی برابر $10/3458$ است. این مقدار برای محاسبه شاخص ناسازگاری (CI) و سپس نرخ ناسازگاری (CR) استفاده خواهد شد.

برای محاسبه شاخص ناسازگاری (CI) از فرمول زیر استفاده می‌کنیم:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{10.3458 - 10}{10 - 1} \approx 0.03484 \quad (2)$$

که در آن: λ_{max} مقدار ویژه محاسبه شده است. n تعداد معیارها است. مقدار ویژه λ_{max} را قبلاً برابر با $10/3458$ محاسبه کردیم و تعداد معیارها $n=10$ است.

بنابراین، شاخص ناسازگاری (CI) برابر $0/384$ است. برای محاسبه نرخ ناسازگاری (CR) از فرمول زیر استفاده می‌کنیم:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0384}{1.49} \approx 0.0258 \quad (3)$$

که در آن: CI شاخص ناسازگاری است. RI شاخص ناسازگاری تصادفی (Random Index) است که برای ماتریس‌هایی با ابعاد مختلف مقدار ثابتی دارد. برای یک ماتریس با ۱۰ معیار، مقدار $RI=1/49$ است.

بنابراین، نرخ ناسازگاری (CR) برابر $0/0258$ است.

بررسی و ارزیابی ناسازگاری در روش AHP با استفاده از نرخ ناسازگاری (CR) انجام می شود. طبق استانداردهای این روش، اگر مقدار CR کمتر از $0/1$ باشد، مقایسات زوجی انجام شده از نظر سازگاری قابل قبول هستند و نیازی به بازنگری ندارند. اگر این مقدار بیشتر از $0/1$ باشد، مقایسات ناسازگار تلقی شده و نیاز به بازنگری و تصحیح دارند.

• نتایج بررسی:

باتوجه به اینکه مقدار نرخ سازگاری محاسبه شده برابر با $0/0258$ و کمتر از $0/1$ است، پس نیاز به بازنگری و تغییر در مقایسات انجام شده نیست و وزن ها و اولویت های معیارها معتبر هستند. در نهایت باتوجه به محاسبات انجام شده، وزن نهایی معیارها به دست آمده است. (نمودار ۱) این نمودار نشان دهنده اولویت هر معیار نسبت به سایر معیارها است.

۴- نتیجه گیری

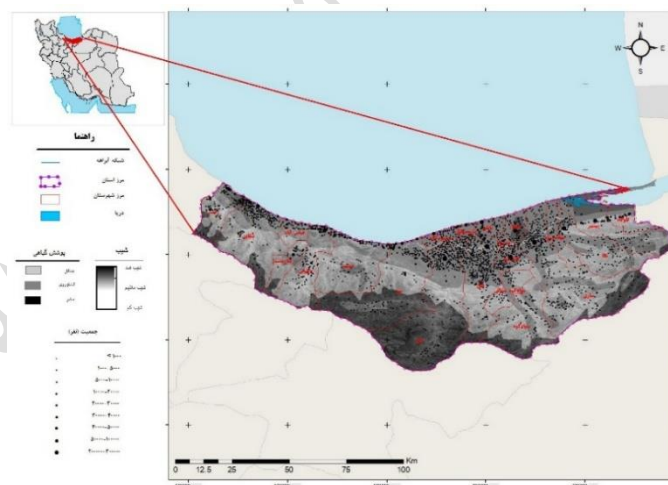
نتایج این مطالعه نشان می دهد که استفاده از ترکیب روش AHP و هوش مصنوعی مولد می تواند به عنوان یک ابزار مؤثر و کارآمد در فرآیند اولویت بندی پارامترهای مؤثر بر سامانه های استحصال آب باران در استان مازندران به کار گرفته شود. این رویکرد با محاسبه نرخ ناسازگاری $0/0258$ (کمتر از آستانه $0/1$)، از سازگاری قابل قبول مقایسه دوجه دو حکایت دارد و امکان ارزیابی چندمعیاره یکپارچه با قابلیت اعتماد بالا را برای سیاست گذاران و مدیران محیط زیستی فراهم می کند. بر اساس یافته ها، شیب زمین با وزن نهایی $0/254$ (بالاترین اهمیت) و بارندگی به عنوان کلیدی ترین معیارهای تأثیرگذار شناسایی شدند، در حالی که ژئومورفولوژی و عمق خاک با وزن های به ترتیب $0/038$ و $0/065$ کمترین تأثیر را در مکان یابی نشان دادند. این نتایج با تحلیل های کیفی موجود در مطالعه همخوانی دارد؛ به طور مثال، تأثیر مستقیم شیب زمین بر افزایش سرعت رواناب و نقش بارندگی به عنوان عامل اصلی تأمین آب در سامانه های استحصال، مؤید اولویت بندی انجام شده است. همچنین، معیارهای قابل ارائه به صورت نقشه (مانند شبکه آبراهه ها، کاربری اراضی، و پوشش گیاهی) در فایل پیوست ارائه شده اند که می توانند به عنوان لایه های اطلاعاتی در سیستم GIS برای طراحی عملیاتی پروژه ها مورد استفاده قرار گیرند. یافته ها حاکی از آن است که تلفیق این روش با پروژه های آب و فاضلاب شهری، به ویژه در مناطق با ویژگی های مشابه استان مازندران، می تواند راهکار مناسبی برای مدیریت پایدار منابع آب تحت شرایط تغییرات اقلیمی باشد. همچنین نتایج حاصل از بررسی های انجام شده در مورد اهمیت و نقش معیارهای انتخابی در سیستم استحصال آب باران، در (جدول ۸) قابل مشاهده است.

جدول ۸- اهمیت و نقش معیارها

شیب زمین: شیب زمین تأثیر مستقیمی بر جریان سطحی آب دارد. افزایش شیب، باعث افزایش سرعت رواناب و کاهش زمان نفوذ آب به خاک می شود. بنابراین، زمین های با شیب ملایم برای استحصال آب باران مناسب تر هستند	شبکه آبراهه ها: نزدیکی به شبکه های آبراهه و رودخانه ها، نقش مهمی در جمع آوری و هدایت آب باران ایفا می کند. مکان هایی که به شبکه های آبراهه نزدیک تر هستند، پتانسیل بهتری برای انتقال رواناب و افزایش کارایی استحصال آب دارند.
---	---

<p>عمق خاک: عمق خاک عامل مهمی در نگهداری آب است. خاک‌های عمیق‌تر ظرفیت بیشتری برای ذخیره سازی آب دارند، بنابراین هرچه عمق خاک بیشتر باشد، توانایی ذخیره آب باران نیز افزایش می‌یابد.</p>	<p>بارندگی: مقدار و توزیع بارندگی اصلی‌ترین عامل تأمین آب در سامانه‌های استحصال است. مناطق با بارندگی زیاد، پتانسیل بیشتری برای جمع‌آوری آب دارند.</p>
<p>زهکشی: سیستم زهکشی زمین نقش کلیدی در مدیریت رواناب دارد. زهکشی مناسب می‌تواند از تجمع آب جلوگیری کرده و باعث بهبود نفوذپذیری شود. زهکشی نامناسب ممکن است باعث هدررفت آب شود.</p>	<p>بافت خاک: بافت خاک بر توانایی ذخیره و نفوذ آب تأثیر می‌گذارد. خاک‌های ماسه‌ای به دلیل ظرفیت نفوذپذیری بالا، سریع‌تر آب را جذب می‌کنند، در حالی که خاک‌های رسی توانایی کمتری در نفوذ آب دارند. در نتیجه، برای استحصال باران، خاک‌هایی با بافت مناسب و توانایی ذخیره‌سازی آب ترجیح داده می‌شوند.</p>
<p>معیارهای اجتماعی: عواملی مانند پذیرش محلی، هزینه‌های اجرایی و نیازهای جوامع می‌تواند بر موفقیت و پذیرش سامانه‌های استحصال آب باران تأثیر بگذارد. بنابراین، در نظر گرفتن نیازهای اجتماعی در این پروژه‌ها ضروری است.</p>	<p>کاربری اراضی: کلاس‌های کاربری اراضی، بر رواناب و میزان آب استحصال شده تأثیر می‌گذارد. زمین‌های غیرمستحکم و جنگلی به دلیل پوشش گیاهی بیشتر، توانایی بیشتری در جذب و نگهداری آب باران دارند.</p>
<p>ژئومورفولوژی: ویژگی‌های سطح زمین، مانند پستی و بلندی‌ها، بر نحوه جریان آب باران و مکان مناسب برای ذخیره‌سازی آن تأثیر می‌گذارد. مناطقی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مناسب، پتانسیل بیشتری برای استحصال و ذخیره آب باران دارند.</p>	<p>پوشش گیاهی: پوشش گیاهی می‌تواند سرعت جریان آب سطحی را کاهش داده و فرصت بیشتری برای نفوذ آب به خاک ایجاد کند. مناطقی با پوشش گیاهی متراکم‌تر، آب بیشتری را ذخیره و خطر فرسایش خاک را کاهش می‌دهند.</p>

باتوجه به انجام این مطالعات برای استان مازندران و نظر به برخی داده‌های موجود، نقشه زیر بعنوان نمونه‌ای از نقشه‌هایی که در پیوست بصورت کامل ارائه شده‌اند، در شکل ۲ نمایش داده می‌شود.



شکل ۲- برهم‌نهی برخی از معیارهای ارائه شده در این مقاله شامل شیب زمین، پوشش گیاهی و جمعیت

۵- محدودیت‌ها

این مطالعه با استفاده از روش AHP و بهره‌گیری از کارشناسان مجازی انجام شد. استفاده از ChatGPT به‌عنوان جایگزین کارشناسان واقعی ممکن است نتایج را کمتر تطابق‌پذیر با شرایط میدانی کند که این امر نیاز به بررسی بیشتر دارد. همچنین با توجه به محدودیت‌های استفاده از نسخه محدود هوش مصنوعی ChatGPT-4، گرفتن خروجی‌های طولانی

و انجام محاسبات طولانی در آن مقدور نیست و انجام یکباره تمامی بخش های محاسبات و خروجی ها نیاز به نسخه نامحدود دارد. البته می توان کار را به چند گام کوچکتر تقسیم کرد و پس از انجام هر گام، با گذراندن مدت زمانی که دسترسی به این هوش مصنوعی قطع می شود، گام های بعد را برای رسیدن به نتیجه نهایی انجام داد. همچنین تهیه نقشه نهایی بر اساس داده های موجود و مقدور برای نمایش صورت پذیرفت.

۶- پیشنهاد های آینده

در ادامه این پژوهش، پیشنهاد می شود همین فرآیند با مشارکت متخصصان دنیای واقعی تکرار شده و نتایج به دست آمده از هوش مصنوعی با داده های حاصل از تجربیات عملی مقایسه شود. در مرحله بعد، این مقایسه می تواند با استفاده از داده های آزمایشگاهی کنترل شده صورت گیرد تا میزان دقت و کارایی هوش مصنوعی در فرآیند تصمیم گیری ارزیابی شود. علاوه بر این، گسترش دامنه تحقیق از طریق شناسایی عوامل تأثیرگذار جدید و تحلیل نتایج در شرایط متنوع می تواند به غنای پژوهش بیفزاید. همچنین، پیشنهاد می شود که نتایج این پژوهش در محیط های عملیاتی واقعی، از جمله در کاربردهایی مانند کنترل سیلاب، مورد آزمایش و ارزیابی قرار گیرد تا میزان اثربخشی و قابلیت اجرایی آن ها سنجیده شود.

۷- مراجع

اکبرپور، ا.، خاشعی سیوکی، ع.، کشاورز، ا.، و فروغی فر، ح.، (۱۳۹۴). "تعیین مکان های مناسب جمع آوری آب باران جهت استفاده در مصارف کشاورزی با استفاده از مدل AHP (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بیرجند)". پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۶(۱۲)، ۶۵-۷۴. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-557-fa.html>

اکبرپور، ا.، صادقی، ش.، فروغی فر، ح.، و شهیدی، ع.، (۱۳۹۴). "مقایسه روش های مکان یابی مناطق مستعد جمع آوری باران به کمک سیستم پشتیبانی تصمیم (DSS) مبتنی بر GIS"، نشریه جغرافیا و توسعه، ۱۳(۳۹)، ۱۴۷-۱۶۴. <https://doi.org/10.22111/gdij.2015.2010>

امامی اسکاردی، م. ج.، شوبیری، غ.، کراچیان، ر.، (۱۴۰۱). "تحلیل روابط بین گرداران و تحلیل تعارض با استفاده از رویکرد درخت تعارض". تحقیقات منابع آب، ۵۴-۵۷، ۱۱۸(۴). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1401.18.4.4.8>

خیرخواه، آ.، محمدی، ف.، و معاریان، ه.، (۱۳۹۴). "تعیین مناطق مستعد استحصال آب باران با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رود سراب شهرستان خوشاب استان خراسان رضوی) (حفاظت از

منابع و توسعه پایدار"، همایش ملی سامانه های سطوح آبخیز باران، دوره ۴.
file:///C:/Users/Admin/Desktop/6841394h0403.pdf

سلطانی، م.، و سلیمانی، ک.، (۱۴۰۱)، "مکان‌یابی مقایسه‌ای جمع‌آوری آب باران (مطالعه موردی: حوضه‌های میخوران و خسروآباد استان کرمانشاه)", مهندسی اکوسیستم بیابان، ۷(۱۸)، ۴۹-۶۲. 10.22052/deej.2018.7.18.49

عربی علی آباد، ف.، و ملکی نژاد، ح.، (۱۳۹۴)، "ارزیابی استحصال آب باران از ساختمان های مسکونی (مطالعه موردی شهر شیراز) (مدیریت و برنامه ریزی شهری)", همایش ملی سامانه های سطوح آبخیز باران، دوره ۴.
<https://sid.ir/paper/868727/fa>

فقیهی، ف.، و جهانتیغ، ح.، (۱۴۰۲)، "تعیین مکان‌های مناسب برداشت آب باران با استفاده از GIS و FAHP"، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۳(۳)، ۲۵۱-۲۶۷. <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.168323>

معماریان، ه.، حسین‌نیا، ا.، توسلی، ا.، کومه، ز.، تاج‌بخش، ح.، عباسی، ع.، و پارسایی، ل.، (۱۳۹۴)، "ملاحظات و استانداردهای زیست‌محیطی اجرای سیستم های استحصال آب باران در منازل مسکونی (مدیریت و برنامه ریزی شهری)", همایش ملی سامانه های سطوح آبخیز باران، دوره ۴. <https://www.sid.ir/paper/868714/fa>

نوروززاده، م.، قانع‌یافقی، م.، و تازه، م.، (۱۴۰۱)، "کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تعیین نقاط مناسب برای احداث سازه‌های جمع‌آوری آب باران"، مهندسی اکوسیستم بیابان، ۷(۲۱)، ۴۵-۵۸. 10.22052/deej.2018.7.21.35

Al-Harbi, K.M.A.S. (2001). "Application of the AHP in project management." *International Journal of Project Management*, 19(1), 19–27. DOI: 10.1016/S0263-7863(99)00038-100038-1)

Alwan, I.A., Aziz, N.A., and Hamoodi, M.N. (2020). "Potential water harvesting sites identification using spatial multi-criteria evaluation in Maysan Province, Iraq." *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 235. DOI: 10.3390/ijgi9040235

Ammar, A., Riksen, M., Ouessar, M., and Ritsema, C. (2016). "Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review." *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 108–120. DOI: 10.1016/j.iswcr.2016.03.001

Bojer, A.K., Bekalo, D.J., Debelee, T.G., Nadarajah, S., and Al-Quraishi, A.M.F. (2024). "Rainwater harvesting site selection for drought-prone areas in Somali and Borena Zones, Oromia Regional State, Ethiopia: A geospatial and multi-criteria decision analysis." *Water*, 16(13), 1789. DOI: 10.3390/w16131789

Darko, A., Chan, A.P.C., Ameyaw, E.E., Owusu, E.K., Pärn, E., and Edwards, D.J. (2019). "Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction."

International Journal of Construction Management, 19(5), 436–452. DOI: 10.1080/15623599.2018.1452098

Li, Z., Boyle, F., and Reynolds, A. (2010). "Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland." *Desalination*, 260(1–3), 1–8. DOI: 10.1016/j.desal.2010.05.035

Martínez-Acosta, L., López-Lambrano, A.A., and López-Ramos, A. (2019). "Design criteria for planning the agricultural rainwater harvesting systems: A review." *Applied Sciences*, 9(24), 5298. DOI: 10.3390/app9245298

Mosase, E., Kayombo, B., Tsheko, R., and Tapela, M. (2017). "Assessment of the suitability of rain water harvesting areas using multi-criteria analysis and fuzzy logic." *Advances in Research*, 10(4), 1–22. DOI: 10.9734/AIR/2017/33983

Nandi, S., and Gonela, V. (2022). "Rainwater harvesting for domestic use: A systematic review and outlook from the utility policy and management perspectives." *Utilities Policy*, 77, 101383. DOI: 10.1016/j.jup.2022.101383

Noori, S., and Ghasemlounia, R. (2019). "A review of criteria in rain water harvesting management." *International Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2(3), 9–16. DOI: 10.1007/978-3-031-28251-513

Raghava Rao, N., Pokkuluri Kiran, S., Amena I, T., Senthilkumar, A., Sivakumar, R., Ashok Kumar, M., and Velusamy, S. (2024). "Enhancing rainwater harvesting and groundwater recharge efficiency with multi-dimensional LSTM and clonal selection algorithm." *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101167. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101167

Raimondi, A., Quinn, R., Abhijith, G.R., Becciu, G., and Ostfeld, A. (2023). "Rainwater harvesting and treatment: State of the art and perspectives." *Water*, 15(8), 1518. DOI: 10.3390/w15081518

Singh, L.K., Jha, M.K., and Chowdary, V.M. (2017). "Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply." *Journal of Cleaner Production*, 142, 1436–1456. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.163

Soh, Q.Y., O'Dwyer, E., Acha, S., and Shah, N. (2023). "Robust optimisation of combined rainwater harvesting and flood mitigation systems." *Water Research*, 245, 120532. DOI: /10.1016/j.watres.2023.120532

Sharifian, H., Emami-Skardi, M. J., Behzadfar, M., & Faizi, M. (2022). "Water sensitive urban design (WSUD) approach for mitigating groundwater depletion in urban geography; through the lens of stakeholder and social network analysis." *Water Supply*, 22(6), 5833–5852. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.206>

Toosi, A.S., Tousi, E.G., Ghassemi, S.A., Cheshomi, A., and Alaghmand, S. (2020). "A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting." *Journal of Hydrology*, 582, 124501. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124501

Ward, S., Memon, F.A., and Butler, D. (2012). "Performance of a large building rainwater harvesting system." *Water Research*, 46(16), 5127–5134. DOI: 10.1016/j.watres.2012.06.043

Zheng, X., Sarwar, A., Islam, F., Majid, A., Tariq, A., Ali, M., Gulzar, S., Khan, M.I., Sardar Ali, M.A., Israr, M., Jamil, A., Aslam, M., and Soufan, W. (2023). "Rainwater harvesting for agriculture development using multi-influence factor and fuzzy overlay techniques." *Environmental Research*, 238, 117189 .DOI: 10.1016/j.envres.2023.117189

پایگاه اطلاع رسانی
رویدادها / ویدئو / پست / نشریه